Technical Note

Public Works Canada / Travaux publics Canada

Solar Programs Office (613) 998-9817

No. 28: December 1984

Computer Program for Simulating Nonlinear Collectors

1. SYNOPSIS

The Solar Programs Office has produced a new computer simulation model that more accurately describes the thermal performance of evacuated tube collectors using heat pipes (ETCs), thermal diodes, refrigerant-filled collectors and other nonlinear flat plate collectors. A linear model computer program was considerably modified to accommodate the new model, which is known as NONLIN.

Work completed by the National Research Council on nonlinear collectors contributed greatly to the development of the computer simulation model and program. This note describes the new collector model and familiarizes the user with the simulation program input parameters.

2. INTRODUCTION

The traditional linear collector model used is based on the Hottel-Whillier equation:

$$Qc = Fr(\tau\alpha)\cdot k\cdot I - FrUL\cdot\Delta T \qquad (1)$$

where
- Qc = energy collected (W/m^2)
- $Fr(\tau\alpha)$ = collector heat removal factor and optical
- k = incident angle modifier
- I = incident solar radiation (W/m^2)
- $FrUL$ = collector heat loss factor ($W/m^2.°C$)
- Ti = fluid inlet temperature (°C)
- Ta = ambient temperature (°C)
- ΔT = $(Ti - Ta)$

In the Hottel-Whillier model, collector heat loss is represented by the FrUL term and is assumed to be linear with respect to ΔT (the difference in temperature between the collector fluid and ambient).

In fact, collector heat loss is composed of three distinct elements: conductive, convective and radiative energy, which behave independently. The first of these is basically linear with ΔT, while the second is close to being linear (usually a 1.25 to 1.33 power of ΔT). The third element, radiation, depends on the difference between the fourth powers of the collector and ambient temperatures.

A major difference between the linear and nonlinear models is their control strategies. The control strategy for the linear collector model depends on a single temperature difference to turn the system on and off. The system shuts down when the collector stagnation temperature exceeds the solar storage tank temperature by an amount less than the controller setting.

The controls for the nonlinear model are based on two temperature settings, one to turn the collectors on and the other to turn them off. The collector threshold of operation is taken into consideration for those collectors that require a minimum intensity of radiation.

3. NONLINEAR COLLECTOR MODEL

The nonlinear collector model more accurately describes the performance of both linear and nonlinear collectors because of the more detailed treatment of control strategies (Ref. 8). The solar energy collected is calculated according to the following equation:

$$Qc = (A+B\,\Delta T)k\,.\,(I-E) - (C+D\,\Delta T).\Delta T \qquad (2)$$

where A, B, C, D and E are collector coefficients:

A = a nondimensional quantity analagous to $Fr\tau\alpha$ in the linear model. It is temperature independent and describes the collector's optical and heat removal efficiency.

B = the temperature-dependent adjustment to the optical and heat removal factors. Its units are $1/(W/m^2.°C)$.

E = a coefficient that accounts for the threshold effect in some collectors, expressed as W/m^2.

$(C+D\,\Delta T)$ = a heat loss coefficient that provides a second order term for heat losses and improves the characterization of heat losses for the given collector temperature range.

Although no fourth power of the temperatures appears in equation (2), NRC testing has proved its validity.

Setting the parameters B, E and D to zero reduces equation (2) to a linear model as follows:

$$Qc = A\,k\,I - C\Delta T \qquad (3)$$

where A and C represent the collector parameters, $Fr\tau\alpha$ and FrUL, respectively.

3.1 Collector Coefficients

At the National Solar Test Facility, nonlinear collectors are tested at two solar radiation levels (900 and 400 W/m^2) and three different values of ΔT $\pm 3°C$ (25°C, 50°C and 75°C). The output energy is measured for each of the six combinations, and the results are fed into a computer program[3] that calculates the best fit for the collector constants, A to E. This creates the best relationship betwen input and output energy. Figure 1 indicates this relationship for the nonlinear collector described in equation (4):

$$Q = (0.68 - 0.0007\Delta T)\,(I - 0.0) - (1.12 + 0.0059\Delta T)\,\Delta T \quad W/m^2 \qquad (4)$$

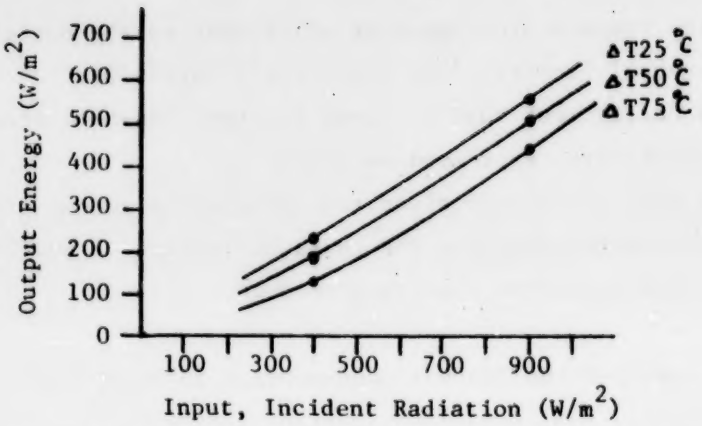

Figure 1: Nonlinear Collector Performance at Different Thermal Fluid Inlet Temperatures

3.2 Collector Stagnation Temperature

In the linear collector model, the stagnation temperature (Tc) is calculated by setting (Qc) in equation (1) to zero and solving for Ti:

$$Tc = \frac{(k\ Fr\overline{\tau\alpha})}{(\ FrUL\ )}\ I + Ta \quad °C \qquad (5)$$

To calculate the collector stagnation temperature in the nonlinear model, (Qc) in equation (2) is set to zero and (Tc) assumes one of the following solutions:

if D = 0, the nonlinear model becomes linear;

$$\text{then}\quad Tc = \frac{A\ k(I-E)}{C-Bk(I-E)} + Ta \quad °C \qquad (6)$$

or,

if D<>0,

$$\text{then}\quad Tc = \left(b + \sqrt{b^2 + 4\ A\ D\ k\ (I-E)}\ \right) /\ 2D + Ta \quad °C \qquad (7)$$

where $b = B\ k(I-E) - C$

The expression under the square root sign becomes negative if the radiation (I) does not exceed the threshold (E) and the system will not turn on. In this case, the simulation program assumes that (Tc) is high enough to turn the system on. However, the system will not operate unless the temperature setting for system shutdown is exceeded.

3.3 Pipe Heat Losses

The linear model accounts for pipe heat losses by adjusting the collector performance parameters, $Fr\overline{\tau\alpha}$ and FrUL, by assuming pipe loss linear with temperature difference.

In NONLIN, linear pipe heat loss is also assumed linear with ΔT. These losses, expressed in watts, are computed as follows:

$$\text{Inlet pipe heat loss} = UA_i\ (T_i - T_a) \qquad (8A)$$

$$\text{Outlet pipe heat loss} = UA_o\ (T_o - T_a) \qquad (8B)$$

where U = pipe heat loss factor, $W/m^2.°C$

Ai, Ao = outdoor pipe surface areas for the collector inlet and outlet respectively, m^2

Ti, To = inlet and outlet thermal fluid temperature respectively, °C.

The pipe heat losses are subtracted from the solar energy collected (Qc), equation (2).

3.4 Heat Exchangers

Load side heat exchangers are modeled in the usual manner by NONLIN program. However, for counter flow external heat exchangers in the collector loop, thermal performance is expressed as follows:

$$\text{Effectiveness} = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_s} \qquad (9)$$

where Tin = heat exchanger inlet temperature, hot side °C
Tout = heat exchanger outlet temperature, hot side °C
Ts = storage tank temperature °C

In the linear collector model, the collector inlet and outlet temperatures are determined by solving the linear algebraic equations (1) and (9). In the nonlinear model, inlet and outlet temperatures are obtained by the iterative calculation of equations (2), (8) and (9) (see Figure 2). The process converges in two to three iterations, and the total computation time is approximately 30% longer than for a non-iterative model.

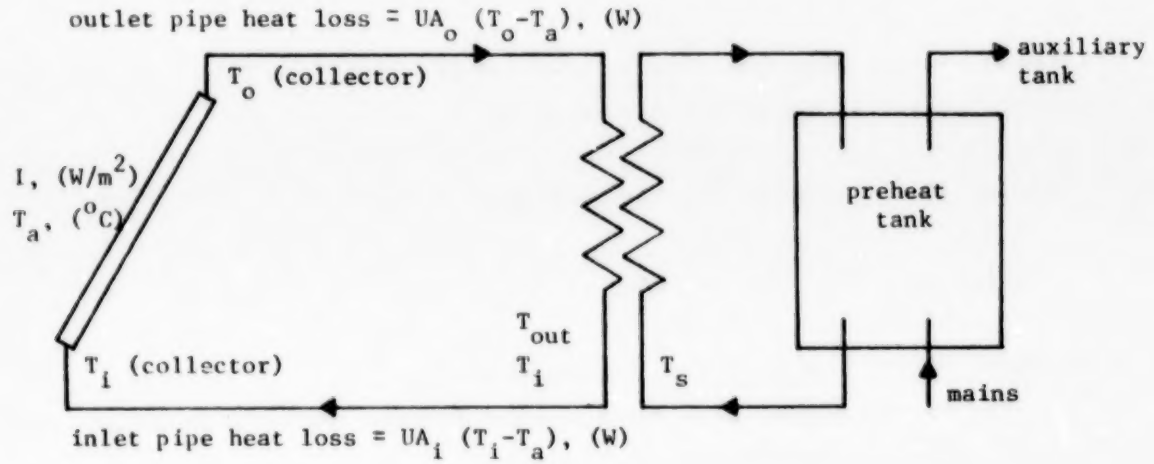

Figure 2: System Schematic

The NONLIN control strategy considers the solar system is turned on if the collector stagnation temperature exceeds the storage temperature by at least the controller "on differential". The system is turned off when the collector outlet temperture (To) exceeds the storage temperature by only an amount equal or less than the controller "off differential".

4. INTNOL PROGRAM STRUCTURE

The interactive non-linear collector (INTNOL) program[10] is capable of creating, modifying, printing and saving input data for the NONLIN model. The following are the INTNOL commands:

CREATE: create a new NONLIN input file
MODIFY: modify the system input file in memory or the default file
PRINT: print an input file
SAVE: save an input file in memory as a permanet file on disk for future use
QUIT: halt execution of the program

When the PRINT command is activated, the current file in memory is automatically saved on disk. Following the QUIT command, the file can be printed using the following command:

```
LIST,F=PRINT
```

Weather data for 18 cities are available on tape. The WWSAVE file stores the weather data of the desired city in the user's catalogue. A city's weather data is called up by the following commands:

```
GET,WWSAVE/UN=DP834CC
BEGIN,,WWSAVE,WEATHER=(city name from list)
```

Then the following message will appear on the computer screen:

```
FILE=(city name)=WILL BE LOADED FROM TAPE
THIS WILL TAKE A FEW MINUTES
```

With the input data file ready and the weather data file (WWSAVE) copied in the user's catalogue, a program run can be initiated by the following command:

```
BEGIN,,NONLIN
```

Working files created during program runs should be purged to minimize disk storage costs. To clear a file user the following command:

```
PURGE,(created file name),(weather file name),
(weather file name or processed data)
```

5. CONCLUSION

The new computer simulation model for nonlinear collectors provides more accurate solar energy predictions than currently existing linear models. The program and the user manual for the nonlinear model are currently available from the Solar Programs Office, Control Data Network, and the INRS (Institut national de recherche solaire).

6. REFERENCES

1. Bliss, R.W., "The Derivation of Several Plate Efficiency Factors Useful in the Design of Flat Plate Solar Heat Collectors", "Solar Energy", Vol. 3, No. 4, December 1959.

2. CSA Standard F378-M1982, "Solar Collectors", The Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 1982.

3. "The CURVE Program: A General Purpose Program for Curve Fitting", prepared under contract to the Solar Programs Office, Public Works Canada, by Sheaff and Associates Engineering Inc., Control #330-905-2, August 1984.

4. Harrison, S.J., "The Effects of Operational and Meteorological Factors on Solar Collector Thermal Performance Test Results", National Research Council, SESCI '84 Conference Proceedings, Calgary, Alberta, August 1984.

5. Harrison, S.J., "The Thermal Performance of Solar Collectors Incorporating Boiling Fluids and Internal Condensers", ASHRAE transactions, National Research Council, 1984.

6. Hottel, H.C., Whillier, A., "Evaluation of Flat Plate Solar Collector Performance", Vol. III, Thermal Processes, transactions of the Conference on the Use of Solar Energy, Tucson, AZ, 1955.

7. "Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors", ASHRAE Standard 93-77, New York, NY, 1977.

8. "NONLIN User's Manual" and program documentation, prepared under contract to the Solar Programs Office by Sheaff and Associates Engineering Inc., Control #330-905-2, August 1984.

Guide technique

Travaux publics Canada | Public Works Canada

Bureau des programmes solaires (613) 998-9817

N° 28: Décembre 1984

Programme informatique de simulation des capteurs non linéaires

1. SOMMAIRE

Le Bureau des programmes solaires a produit un nouveau modèle informatique de simulation qui décrit avec davantage de précision le rendement thermique des capteurs à tube sous vide constitués de caloducs et de diodes thermiques, des capteurs à frigorigène et d'autres capteurs plans non linéaires. Un programme informatique de modélisation linéaire a été considérablement modifié dans son adaptation au nouveau modèle, appelé NONLIN.

Les travaux menés par le Conseil national de recherches sur les capteurs non linéraires ont grandement contribué à la mise au point du modèle et du programme de simulation. La présente notice décrit le nouveau modèle de capteur et familiarise l'utilisateur avec les paramètres d'entrée du programme de simulation.

2. INTRODUCTION

Le modèle classique de capteur linéaire est basé sur l'équation de Hottel-Whillier:

$$Qc = Fr(\tau\alpha)k \cdot I - FrUL\ T \qquad (1)$$

dans laquelle

- Qc = énergie collectée (W/m^2)
- $Fr(\tau\alpha)$ = facteur d'extraction de chaleur et facteur optique du capteur
- k = modificateur de l'angle d'incidence
- I = rayonnement solaire incident (W/m^2)
- FrUL = facteur de pertes thermiques du capteur ($W/m^2,°C$)
- Ti = température d'entrée du fluide (°C)
- Ta = température ambiante (°C)
- ΔT = (Ti - Ta)

Dans le modèle Hottel-Whillier, les pertes thermiques du capteur sont représentées par le terme FrUL et il est supposé qu'elles sont linéaires par rapport a Δt (l'écart de température entre le fluide du capteur et la température ambiante).

De fait, les pertes thermiques du capteur se composent de trois éléments distincts: les pertes par conduction, les pertes par convection et les pertes de rayonnement, qui sont indépendantes les unes les autres. Le premier de ces éléments est fondamentalement linéaire en fonction de t, tandis que le second est presque linéaire (habituellement une puissance de 1,25 à 1,33 de Δt). Le troisième élément, les pertes par rayonnement, est proportionnel à la différence entre les quatrièmes puissances de la température du capteur et de la température ambiante.

Une différence marquée entre le modèle linéaire et le modèle non linéaire tient au principe de régulation. Dans le modèle du capteur linéaire, le système est mis en marche et arrêté en fonction de la variation d'une seule grandeur, qui est un écart de température. Le système est arrêté lorsque la température de stagnation du capteur est supérieure à la température du réservoir de stockage par une quantité inférieure au point de consigne du régulateur.

Dans le modèle du capteur non linéaire, il existe un point de consigne pour la mise ne marche du système et un autre pour son arrêt. Il existe par ailleurs un seuil de fonctionnement pour les capteurs qui nécessitent un rayonnement d'intensité minimale.

3. MODÈLE DU CAPTEUR NON LINÉAIRE

Le modèle du capteur non linéaire décrit avec davantage de précision le rendement à la fois des capteurs linéaires et des capteurs non linéaires parce qu'il traite plus en profondeur les principes de régulation. L'énergie solaire collectée est calculée d'après la formule suivante:

$$Qc = (A+B\ \Delta T)k\ (I+E) - (C+D\ \Delta T)\ \Delta T \qquad (2)$$

dans laquelle

A, B, C, D et E sont les coefficients du capteur:

A = grandeur sans dimension analogue à $Fr\tau\alpha$ du modèle linéaire. Cette grandeur est indépendante à la température et décrit le rendement optique et d'extraction de chaleur du capteur.

B = coefficient de correction dépendant de la température du facteur d'extraction de chaleur et du facteur optique. S'exprime en $1/(W/m^2.°C)$.

E = coefficient d'effet de seuil pour certains capteurs. S'exprime en W/m^2.

$(C+D\ \Delta T)$ = coefficient de pertes thermiques qui constitue un terme de second ordre pour les pertes thermiques et qui améliore la caractérisation de ces pertes pour une plage donnée de température du capteur.

Bien qu'aucune quatrième puissance de la température n'y apparaît, les essais du CNRC ont prouvé la validité de l'équation (2).

L'équation (2) se ramène au modèle linéaire, comme suit, lorsqu'on rend égaux à zéro les paramètres B, E et D:

$$Qc = A\ k\ I - C\ \Delta T \qquad (3)$$

dans laquelle A et C représentent les paramètres du capteur, soit respectivement $Fr\tau\alpha$ et FrUL.

3.1 Coefficients du capteur

Des capteurs non linéaires ont été testés à l'Installation nationale d'essai solaire (INES) pour deux niveaux de rayonnement solaire (900 et 400 W/m^2) et pour trois valeurs différentes de $\Delta t \pm 3°C$ (25°C, 50°C et 75°C). L'énergie de sortie a été mesurée pour chacune des six combinaisons et les résultats ont été entrés dans un programme informatique (3) qui calcule le meilleur ajustement des constantes A à E du capteur. Il est possible d'ainsi obtenir la meilleure relation entre l'énergie d'entrée et l'énergie de sortie. La figure 1 illustre cette relation pour le capteur non linéaire décrit par l'équation (4):

$$Q = (0.68 - 0.0007\Delta T)\ (I - 0.0) - (1.12 + 0.0059\Delta T)\ \Delta T,\ W/m^2 \qquad (4)$$

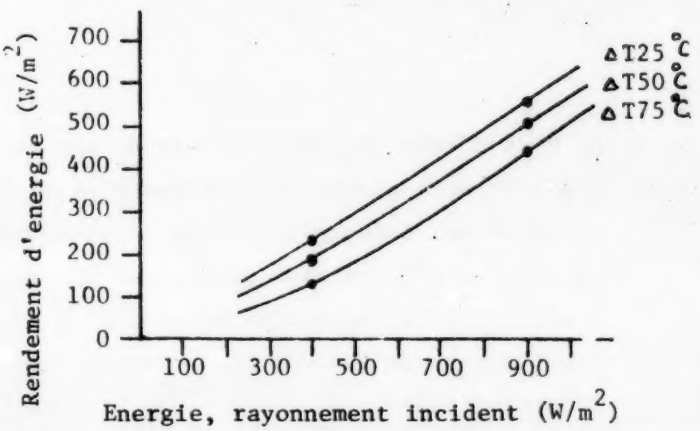

Figure 1: Rendement du capteur non linéaire pour différentes températures d'entrée du fluide caloporteur

3.2 Température de stagnation du capteur

Dans le modèle du capteur linéaire, la température de stagnation (Tc) se calcule en rendant égale à zéro la grandeur (Qc) de l'équation (1) et par détermination subséquente de Ti:

$$Tc = \frac{(k\ Fr\tau\alpha)}{(\ FrUL\ )}\ I + Ta,\ °C \qquad (5)$$

Pour calculer la température de stagnation du capteur du modèle non linéaire, la grandeur (Qc) de l'équation (2) est rendue égale à zéro tandis qu'il est attribué à (Tc) l'une des solutions suivantes:

Si D = 0, le modèle non linéaire devient linéaire

$$\text{et alors } Tc = \frac{A\ k(I-E)}{C-Bk(I-E)} + Ta,\ °C \qquad (6)$$

or,

Si D$\langle\rangle$ 0,

$$\text{alors } Tc = (b + \sqrt{b^2 + 4\ A\ D\ k\ (I-E)}\ )\ /\ 2D + Ta,\ °C \qquad (7)$$

où $b = B\ k(I-E) - C$

L'expression apparaissant sous le symbole racine carré devient négative si le rayonnement (I) ne dépasse pas le seuil (E), le système ne se mettant alors pas en marche. Dans ce cas, le programme de simulation suppose que (Tc) est suffisamment élevée pour mettre en marche le système. Cependant, le système ne fonctionne pas à moins que la température de consigne d'arrêt du système ne soit dépassée.

3.3 Pertes thermiques dans la tubulure

Le modèle linéaire tient compte des pertes thermiques dans la tubulure par réglage des paramètres de rendement $Fr\tau\alpha$ and FrUL du capteur, et il est supposé que ces pertes sont linéaires en fonction de l'écart de température.

Dans le programme NONLIN, il est également supposé que les pertes thermiques dans la tubulure sont linéaires en fonction de ΔT. Ces pertes, qui s'expriment en watts, sont calculées de la façon suivante:

pertes dans la tubulure d'entrée = UAi (Ti-Ta) (8A)

pertes dans la tubulure de sortie = UAo (To-Ta) (8B)

dans lesquelles U = facteur de pertes dans la tubulure, en $W/m^2.°C$

Ai, Ao = superficie de la surface extérieure de la tubulure, respectivement de l'entrée et de la sortie du capteur, en m^2

Ti, To = respectivement la température du fluide caloporteur à l'entrée et la sortie, en °C

Les pertes thermiques dans la tubulure sont soustraites de l'énergie solaire collectée (Qc) de l'équation (2).

3.4 Échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur à charge latérale sont modélisés de la façon habituelle dans le modèle NONLIN. Cependant, le rendement thermique des échangeurs à contre-courant externe faisant partie du circuit du capteur s'exprime de la façon suivante:

$$\text{Rendement} = \frac{Tin - Tout}{Tin - Ts} \qquad (9)$$

dans laquelle

Tin = température d'entrée de l'échangeur de chaleur, côté chaud, °C

Tout = température de sortie de l'échangeur de chaleur, côté chaud, °C

Ts = température du réservoir de stockage, °C

Dans le modèle du capteur linéaire, les températures d'entrée et de sortie du capteur sont déterminées par résolution des équations algébriques linéaires (1) et (9). Dans le modèle du capteur non linéaire, les températures d'entrée et de sortie s'obtiennent par calcul itératif des équations (2), (8) et (9) (voir la figure 2). Le processus converge après deux ou trois itérations, et le temps total de calcul est approximativement 30% plus long que dans le cas d'un modèle non itératif.

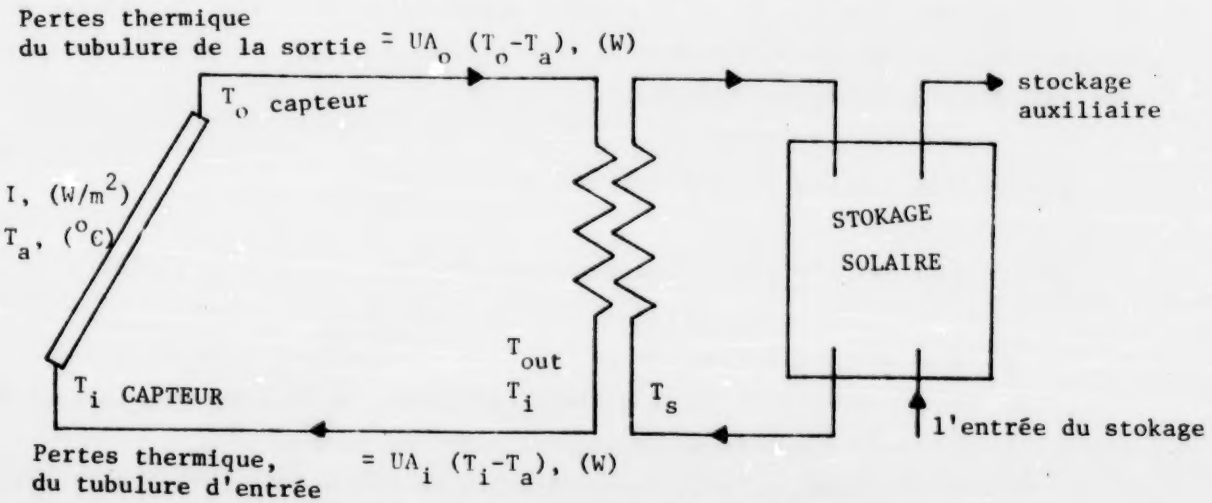

Figure 2: Schématisation du système

Dans le programme NONLIN, la régulation est telle que le système solaire est mis en marche quand la température de stagnation du capteur dépasse la température du réservoir de stockage par une quantité au moins égale au différentiel de mise en marche du régulateur. Le système est arrêté quand la température de sortie du capteur (To) dépasse la température du réservoir de stockage uniquement par une quantité égale ou inférieure au différentiel d'arrêt du régulateur.

4. STRUCTURE DU PROGRAMME INTETC

Le programme intéractif de modélisation du capteur non linéaire INTNOL [10] peut créer, modifier, imprimer et stocker des données d'entrée pour le modèle NONLIN. Les commandes du programme INTNOL sont les suivantes:

CREATE: création d'un nouveau fichier d'entrée NONLIN
MODIFY: modification du fichier d'entrée en mémoire ou du fichier de messages
PRINT: impression d'un fichier d'entrée
SAVE: versement sur disque d'un fichier d'entrée en mémoire; il sert alors de fichier permanent pour utilisation future
QUIT: arrêt de l'exécution du programme

Lorsque la commande PRINT est donnée, le fichier courant en mémoire est automatiquement versé sur disque. Une fois la commande QUIT donnée, le fichier peut être imprimé par la commande suivante:

LIST,F=PRINT

Les données climatologiques de 18 villes sont disponibles sur bande. Le fichier WWSAVE emmagasine les données climatologiques de la ville désirée dans le catalogue de l'utilisateur. Les données climatologiques d'une ville sont appelées par les commandes suivantes:

GET,WWSAVE/UN=DP834CC
BEGIN,,WWSAVE,WEATHER=(nom de la ville donnée sur la liste)

Le message suivant apparaît alors sur l'écran:

FILE=(nom de la ville)**=WILL BE LOADED FROM TAPE**
THIS WILL TAKE A FEW MINUTES

Lorsque le fichier de données d'entrée est prêt et que le fichier des données climatologiques (WWC) a été recopié dans le catalogue de l'utilisateur, il est possible de commencer le passage du programme par la commande suivante:

BEGIN,,NONLIN

Les fichiers de travail créés pendant le passage du programme doivent être vidés afin de réduire au minimum les coûts de stockage sur disque. Le vidage d'un fichier se fait à l'aide de la commande suivante:

PURGE,(nom du fichier créé), (nom du fichier climatologique),
(nom du fichier climatologique ou données traitées)

5. CONCLUSION

Le nouveau modèle informatique de simulation de capteurs non linéaires produit des prévisions plus précises que les modèles linéaires courants. Le programme et le manuel de l'utilisateur du modèle non linéaire peuvent être obtenus du Bureau des programmes solaires, de Control Data Network et de l'INRS (Institut national de recherche solaire).

6. RÉFÉRENCES

1. Bliss, R.W., "The Derivation of Several Plate Efficiency Factors Useful in the Design of Flat Plate Solar Heat Collectors", "Solar Energy", vol. 3, n° 4, décembre 1959.

2. Norme Acnor F378-M1982, "Capteurs solaires", Association canadienne de normalisation, Rexdale (Ontario), 1982.

3. "The CURVE Program: A General Purpose Program for Curve Fitting", préparé à contrat pour le Bureau des programmes solaires, Travaux publics Canada, Sheaff and Associates Engineering Inc., n° de contrôle 330-905-2, août 1984.

4. Harrison, S.J., "The Effects of Operational and Meteorological Factors on Solar Collector Thermal Performance Test Results", Conseil national de recherches, Actes de la Conférence 1984 de SESCI, Calgary (Alberta), août 1984.

5. Harrison, S.J., "The Thermal Performance of Solar Collectors Incorporating Boiling Fluids and Internal Condensers", Actes de l'ASHRAE, Conseil national de recherches, 1984.

6. Hottel, H.C., Whillier, A., "Evaluation of Flat Plate Solar Collector Performance", Vol. III, Thermal Processes, actes de la Conférence on the Use of Solar Energy, Tucson, AZ, 1955.

7. "Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors", ASHRAE Standard 93-77, New York, NY, 1977.

8. "NONLIN User's Manual" et documentation sur le programme, préparé à contrat pour le Bureau des programmes solaires par Sheaff and Associates Engineering Inc. n° de contrôle 330-905-2, août 1984.